

Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении

© 2021

Ермаков Сергей Борисович, директор научно-образовательного центра «Северсталь-Политех»
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург (Россия)

E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Аннотация: Аддитивные технологии относятся к числу наиболее стремительно развивающихся направлений современного производства. Для обеспечения поступательного движения развития аддитивных технологий в РФ необходимо обеспечить максимальную доступность отечественных предприятий к аддитивному сырью – сферическим металлическим порошкам, однако отсутствие отечественных установок для производства таких порошков затрудняет решение этой задачи. В СПбПУ Петра Великого были разработаны и успешно прошли промышленные испытания системы плазменной атомизации твердых металлических фидстоков различных химических составов. В работе приводятся результаты исследования влияния ряда технологических параметров на гранулометрический размер, форму и дефектность порошков стали 12X18H9 и сплава ВЖ98. Приведены результаты исследований влияния таких параметров распыления, как сила тока и скорость плазмообразующего газа, подаваемых на плазмотрон и объем защитного газа, подаваемого в факел распыления через форсунки системы «кипящего слоя», расположенного в средней части камеры распыления атомизера. Показано, что, повышая силу тока и скорость плазмообразующего газа, можно снизить средний размер частиц порошка, а изменяя объем подачи защитного газа – регулировать форму частиц. Анализ химического состава полученных порошков показал, что в процессе распыления угара легирующих элементов не происходит и состав порошка не отличается от составов исходных фидстоков. В работе приведены разработанные режимы распыления фидстоков сплавов, показана возможность получения металлических порошков с уровнем сферичности 92–96 % и минимальным – не превышающим 0,5 % от общей массы порошка – количеством частиц с неметаллическими включениями, наружными и внутренними дефектами.

Ключевые слова: аддитивные технологии; плазменная атомизация; порошки металлов и сплавов; режимы распыления; гранулометрический состав; сферичность; сталь 12X18H9; сплав ВЖ98.

Для цитирования: Ермаков С.Б. Регулирование формы и размеров частиц порошков при плазменном распылении // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 1. С. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15.

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии позволяют полностью пересмотреть основные подходы к созданию новых машин и механизмов. С использованием аддитивных машин в опытном производстве удастся быстро и без значительных материальных затрат изготавливать экспериментальные агрегаты, их узлы и детали, создавать принципиально новые машины и механизмы; в условиях удаленности добывающих и перерабатывающих производств выполнять ремонтно-восстановительные работы, печатая вышедшие из строя узлы: зубчатые колеса, траки гусениц и другие детали карьерных экскаваторов и бульдозеров. По данным Wohlers Associates, мировой рынок аддитивных технологий в 2014 году составил около 3 млрд долларов при средних темпах роста на уровне 20–30 %, а к исходу 2020 года может достичь 16 млрд долларов¹, что подтверждается данными отечественных исследований², в том числе [1; 2].

¹ 3D Printing and Additive Manufacturing Global State of the Industry: Wohler's Report 2020. Colorado: Wohler associates, 2020. 113 p.

² Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы // Металлы Евразии. 2017. № 3. С. 2–6.

К числу передовых отраслей, широко внедряющих 3D-печать и постепенно отказывающихся от традиционных вычитающих технологий, следует отнести авиакосмическую промышленность [3], низкотемпературное и криогенное машиностроение, судостроение [4], энергетику, медицинскую промышленность [5]. Наряду с технологической целесообразностью перевода производства деталей на аддитивные технологии в этих отраслях, необходимо экономическое обоснование перестройки производства. Вопросы экономического обоснования замещения традиционных методов производства аддитивными широко обсуждаются в настоящее время. Так, в [6; 7] проработаны проблемы экономической классификации аддитивных технологий и показано, что наибольший эффект внедрения аддитивных методов производства достигается в случае изготовления наиболее технологически сложных узлов и деталей. В работе [8] обосновываются условия перевода на аддитивные методы производства крупных серий изделий.

Однако при всей научно-экономической проработке вопросов замещения традиционных технологий на аддитивные внедрение 3D-печати сталкивается с целым рядом технологических трудностей. К числу основных проблем, возникающих при переходе от традиционных технологий к аддитивным, относятся как малое число марок порошковых сталей и сплавов, представленных

на рынке, так и особенности производства, упаковки, транспортировки и хранения металлических порошков. В [9] показано, что даже химически эквивалентные порошки, полученные различными методами атомизации, могут иметь различные скорости окисления в воздушной среде, отличающиеся физико-механические и технологические свойства. Например, из анализа результатов исследований авторов работы [10] следует, что существует более 130 технологических параметров, влияющих на процесс лазерного сплавления порошковых частиц, в том числе это параметры исходных порошковых частиц, среди которых их форма, гранулометрический и химический составы, наличие внешних и внутренних дефектов.

В самом начале XXI века Россия находилась в первых рядах стран, развивающих аддитивные технологии, но в последнее десятилетие было отмечено постепенное снижение темпов внедрения аддитивной продукции в промышленность. Одной из причин такого замедления является отсутствие отечественной производственной базы металлических порошков для аддитивных машин. В настоящий момент большая часть порошков поставляется из-за рубежа. По мнению академика Е.Н. Каблова, для имеющегося российского парка установок аддитивного производства уже сейчас необходимо около 20 тонн порошков в год, и объем потребления порошков будет постоянно увеличиваться [11]. Учитывая проблему санкционных ограничений поставок порошков для аддитивных машин, отечественное производство металлических порошков приобретает большое значение. Главным показателем возможности использования металлических порошков в 3D-принтерах является их металлургическое качество.

Еще в середине XX века в нашей стране началось активное развитие порошковой металлургии, в том числе и оборудования для производства металлических порошков. Были разработаны основные технологии и принципы производства. В качестве основных методов получения порошков были использованы физико-химические и физико-механические технологии производства. Порошки, полученные этими методами, отличаются друг от друга фазовым составом, морфологией поверхности, микроструктурой частиц, физико-технологическими свойствами и конечной чистотой. Наибольший объем выпуска порошков приходился на физико-механические способы получения, однако получаемые этими способами частицы имеют неравновесные формы, обладают невысокой текучестью и из-за особенностей технологического процесса аддитивной печати, требующей исходного сырья правильной сферической формы, не могут быть использованы в аддитивных машинах. Как показала практика, для аддитивного производства наилучшим методом получения порошков явился процесс распыления расплавленного металла направленным потоком инертного газа. Полученные таким методом порошки обладают высокой чистотой поверхности частиц, в них практически отсутствуют неметаллические включения и посторонние примеси; микроструктура металлов, полученных этим методом, однородна, а процессы их кристаллизации предсказуемы [12].

Рядом исследований было установлено, что максимальная химическая однородность получаемого по-

рошка и стабильность его гранулометрического состава достигается при распылении потоками газа твердых фидстоков – проволоки распыляемого вещества. Поток газа, используемый при распылении, должен иметь температуру, значительно превышающую температуру плавления фидстока. Наиболее простым и технологически доступным методом такого распыления является метод распыления плазменным факелом, создаваемым дуговым плазмотроном. Использование дуговых плазмотронов позволяет регулировать в широких пределах энергосиловые параметры факела, поэтому именно плазменная атомизация является наиболее перспективным методом получения порошков для аддитивных машин [13]. Так, например, изменяя объем подачи плазмообразующего газа, можно изменять кинетическую энергию газоплазменного факела, что приводит к большему или меньшему дроблению капель расплава, т. е. возникает возможность регулирования гранулометрического состава получаемого порошка. Изменяя силу тока, подаваемого на плазмотрон, можно регулировать скорость расплавления фидстока и объем мгновенно распыляемой жидкости; регулируя диаметр фидстока, можно учесть влияние на процесс распыления основных теплофизических свойств распыляемого металла – его температуру плавления, теплоемкость и теплопроводность. При этом также необходимо учитывать, что увеличение диаметра фидстока, с одной стороны, приводит к повышению производительности процесса, с другой – к снижению количества мелких частиц в порошке, так как при использовании проволоки больших диаметров увеличивается моментная масса расплава, поступающего в зону распыления, и уменьшается число взрывообразного разбрызгивания крупных первичных капель [14]. Это приводит к определенным противоречиям: с одной стороны, увеличение диаметра проволоки – это повышение производительности процесса, с другой – увеличение диаметра – это увеличение среднего диаметра частиц получаемого порошка, снижение выхода товарной продукции (обычно это порошки диаметрами от 100–140 до 10–20 мкм). Определение оптимального соотношения между гранулометрическим составом получаемого порошка и диаметром используемого фидстока является одной из важнейших задач при разработке технологии и режимов плазменного метода [15; 16].

Цель исследования – определение возможности регулирования размеров и формы металлических порошков, получаемых при распылении в плазменном атомайзере, разработанном и изготовленном в СПбПУ Петра Великого, твердых фидстоков нержавеющей сталей и сплавов и установление основных технологических параметров распыления, оказывающих максимальное влияние на процессы сфероидизации порошковых частиц.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования влияния технологических параметров плазменного распыления на форму и размеры частиц металлических порошков были проведены на плазменном атомайзере СПбПУ [17] с горизонтальной подачей твердого фидстока, работающего в трехплазмотронном режиме, т. е. при одновременном распылении в одной камере атомайзера трех фидстоков тремя

независимыми генераторами плазмы. При этом каждый из узлов распыления может работать в своем технологическом режиме, поддерживая заданный уровень силы тока, скоростей подачи плазмообразующего газа и фидстока, создавая необходимые условия для распыления. Принципиальная схема атомайзера приведена на рис. 1.

Для исследований были использованы твердые фидстоки – проволоки диаметром 1,6 мм стали 12Х18Н9 и сплава ВЖ98 (ХН60ВТ). Химические составы исходных фидстоков соответствовали требованиям ГОСТ 5632-14. При проведении опытов по распылению проволок сила тока, подаваемого на каждый из плазмотронов, изменялась от 250 до 350 А, скорость плазмообразующего газа – аргона высокой чистоты (ГОСТ 10157-79) – от 30

до 50 л/мин, объем подачи защитного газа в систему противотока – от 0 до 20 л/мин, скорость подачи проволок – 3,5 м/мин. Время каждого опыта составляло 10 мин, что позволяло не опасаться излишнего роста температуры газа в камере распыления и не принимать мер по ее стабилизации.

Учитывая, что в зависимости от типа 3D-принтеров в основном могут использоваться порошки либо фракций 20–60 мкм – установки селективного лазерного сплавления, либо 40–140 мкм – системы прямого лазерного сплавления, были рассчитаны доли выхода порошков этих фракций. Расчет был выполнен на установке CAMSIZER X2 Microtrac MRB, использующей технологию динамического анализа изображений сыпучих образцов.

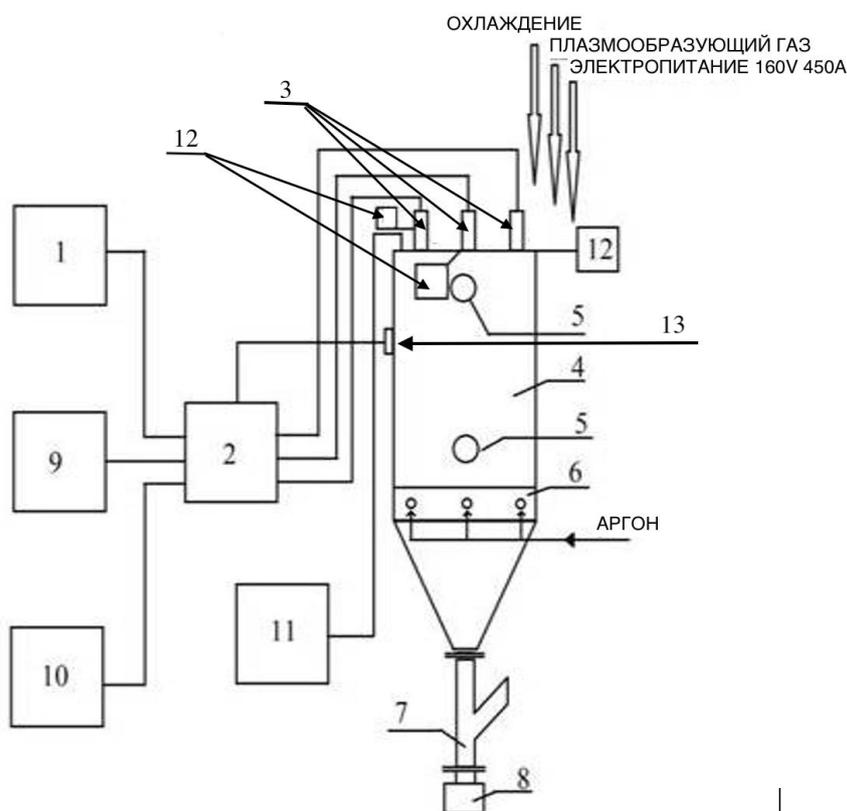


Рис. 1. Принципиальная схема плазменного атомайзера СПбПУ:

- 1 – источник питания; 2 – блок управления и безопасности; 3 – плазмотроны (показана трехплазменная компоновка); 4 – колонна распыления; 5 – окна-глядельки для визуализации процесса распыления;
- 6 – пояс «кипящего слоя» – система разнонаправленных форсунок, через которые подается защитный газ;
- 7 – система отвода плазмообразующего газа в процессе распыления; 8 – система сбора порошков;
- 9 – газовая система; 10 – система охлаждения плазмотронов; 11 – система охлаждения колонны распыления;
- 12 – система подачи твердых фидстоков; 13 – измерительная аппаратура (устройство управления и безопасности)

Fig. 1. Basic diagram of plasma atomizer of St. Petersburg Polytechnic University:

- 1 – power supply; 2 – control and security unit; 3 – plasma torch (three-plasma torch assembly is shown);
- 4 – spraying column; 5 – windows-observation holes for the spraying process visualization;
- 6 – fluidized bed area – the system of multidirectional nozzles supplying protective gas;
- 7 – the system for plasma-forming gas disposal during the spraying process; 8 – powders gathering system;
- 9 – gas system; 10 – plasma torch cooling system; 11 – spraying column cooling system;
- 12 – solid feedstock delivery system; 13 – measuring equipment (control and security unit)

³ Анализатор размера и формы частиц CAMSIZER X2. URL: <https://laboimpex.ru/catalog/analizatory-formy-i-razmera-chastich/camsizer-x2>.

Металлографическое исследование микроструктуры распыленных порошков производилось с помощью оптического микроскопа Reihert-Jung MeF3A при увеличении 50÷1000 крат, оснащенного количественным анализатором изображений Thixomet, и метода растровой электронной микроскопии в сочетании с микро-рентгеноспектральным анализом при помощи микроскопа SUPRA 55VP WDS, оснащенного энергодисперсионным рентгеновским спектрометром.

Для определения влияния энергосиловых параметров распыления на гранулометрический состав распыленных порошков, полученных в ходе каждого из проведенных экспериментов, были проведены исследования порошков на ситовом анализаторе AS200 Basic с набором сит от 20 до 200 мкм. С этой целью полученный в ходе эксперимента порошок делился на три части, и проводились три ситовых анализа материала. Приведенные в работе данные о гранулометрическом составе порошков являются средними значениями результатов трех анализов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Диспергирование расплавленных плазмой металлических капель должно определяться двумя основными параметрами процесса – тепловой мощностью плазменной дуги, определяемой силой тока, подаваемого на плазмотрон, и скоростью подачи плазмообразующего

газа, а качество получаемого порошка – скоростью его охлаждения, т. е. как теплофизическими характеристиками распыляемого материала, так и его теплообменом с окружающей частицу газовой средой. В таблице 1 приведены результаты исследования влияния силы тока (I_p) и скорости плазмообразующего газа (V_2) на гранулометрический состав частиц порошков обоих сплавов.

Доля порошков фракций 20–60 мкм и 40–140 мкм обоих сплавов интенсивно нарастает при увеличении скорости плазмообразующего газа от 9–14 до 25 % и от 30–39 до 57–61 % соответственно; роль силы тока более сложна: при повышении силы тока до 300 А процент выхода интенсивно растет, достигая максимума, и при больших значениях силы тока уже практически не изменяется.

Дополнительное подстуживание частиц распыленного порошка системой «кипящего слоя», обеспечивающей подачу холодного газа в направлениях перпендикулярных потоку частиц и вдоль стенок колонны, обеспечивает увеличение доли сферичности частиц (рис. 2) и снижение общего числа дефектов частиц порошков, описанных в ГОСТ 58418-2019.

Отсутствие или недостаточная мощность потока газа в системе «кипящего слоя» не позволяет обеспечить необходимую форму частиц порошка. При этом доли порошков сферической и округлой формы (ГОСТ 25849-83) в распыленной массе примерно равны. При обеспечении уровня подачи защитного газа в систему

Таблица 1. Влияние энергосиловых параметров распыления на гранулометрический состав порошка
Table 1. The influence of spraying energy-power parameters on the powder granulometric composition

I, А	V ₂ , л/мин	Гранулометрический состав (мкм), % к общему						
		<20	20–40	40–60	60–100	100–140	140–200	>200
Сталь 12X18Н9								
250	30	2	5	9	11	14	14	45
	50	4	7	12	15	15	13	34
300	30	2	6	10	12	15	16	39
	50	5	10	14	19	16	14	22
350	30	4	6	11	14	18	16	31
	50	6	10	15	20	16	13	20
Сплав ВЖ98								
250	30	2	3	6	9	12	17	51
	50	3	6	8	12	14	14	43
300	30	4	7	10	12	15	16	36
	50	7	11	14	17	15	14	22
350	30	5	7	11	13	14	14	37
	50	8	10	15	18	14	13	22

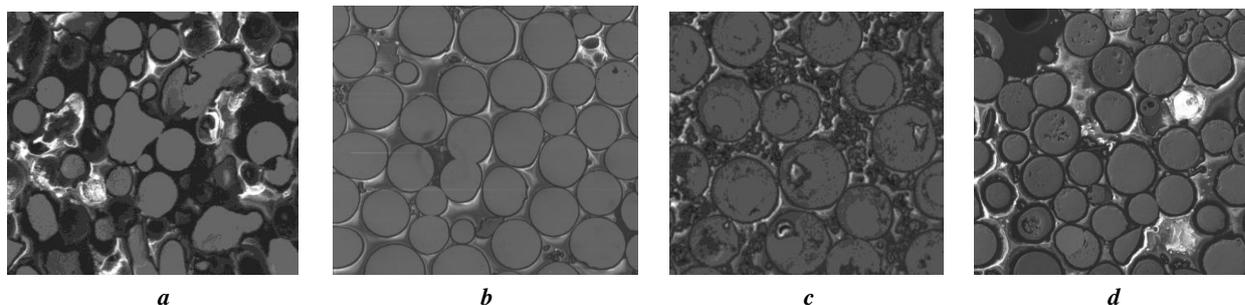


Рис. 2. Форма частиц порошков стали 12Х18Н9 (а, с) и сплава ВЖ98 (b, d) после распыления с отключенной (а, с) системой «кипящего слоя» и после подачи защитного газа объемом 15 л/мин (b, d). Увеличение ×500
Fig. 2. Particle shape of powders of 12H18N9 steel (a, c) and VG98 alloy (b, d) after spraying with the deactivated (a, c) fluidized bed system and after feeding the protective gas with a volume of 15 l/min (b, d). Zoom ×500

«кипящего слоя» в 10 и более л/мин доля сферичности порошков возрастает до 92–96 %. Дальнейшее увеличение объема продувки практически не изменяет процент порошков сферической формы.

Металлографический анализ порошков (рис. 2 b, 2 d) показал, что в металле порошков обоих сплавов, распыленных при силе тока 300 А и подачах плазмообразующего и защитного газов в объеме 50 и 15 л/мин, доля дефектных частиц порошков с различными видами дефектов: расслоений, трещин и т. п. (раздел 3.2. ГОСТ 58418-2019) – не превышала в разных партиях распыленных порошков 0,2–0,5 %. Практически отсутствуют внутренние дефекты – поры, инородные, в том числе металлические, включения, а анализ количества неметаллических включений, выполненных в соответствии с требованиями ГОСТ 1778-70 (таблица 2), показал, что их содержание практически не отличается от содержания этих включений в исходных проволоках.

Анализ химического состава распыленных порошков, выполненный микрорентгеноспектральным методом, показал, что составы распыленных порошков и исходных проволок обоих материалов практически идентичны. На рис. 3 и в таблице 3 в качестве примера приведены результаты анализа проволоки и порошка стали 12Х18Н9. Среднее содержание азо-

та в порошке стали составляет 0,006 мас.%, кислорода – 0,017 мас.%.
 Для проверки применимости полученных порошков в системах аддитивной печати методом послойного лазерного сплавления были изготовлены образцы для механических испытаний. Механические свойства образцов стали 12Х18Н9 следующие: временное сопротивление – 545 МПа, предел текучести – 205 МПа, относительное удлинение – 37 %, у сплава ВЖ98 – 780 МПа, 345 МПа, 49 % соответственно. Полученные результаты соответствуют требованиям к механическим свойствам обоих материалов, полученных традиционными методами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Процесс образования металлической частицы при распылении в низкотемпературной плазме может условно быть разделен на несколько стадий: образование крупной капли неправильной формы, ее взрывообразное разбрызгивание на мелкие сферические капли, их кристаллизация, охлаждение частицы во время движения в газовом объеме камеры распыления, температура которого жестко контролируется, и, наконец, сбор частиц распыленного порошка без доступа к ним внешней

Таблица 2. Неметаллические включения в частицах порошка стали 08Х18Н9 и сплава ВЖ98
Table 2. Nonmetallic inclusions in the particles of 08H18N9 steel and VG98 alloy powders

Сплав	вид	Неметаллические включения (по методу Ш4 ГОСТ 1778-70)								
		ОТ*	ОС	СХ	СП	СН	С	НС	НТ	НА
12Х18Н9	фидсток	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	порошок	0	0	0	0	1	0	0	0	0
ВЖ98	фидсток	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	порошок	0	0	0	0	1	0	0	1	1

*Примечание: ОТ – оксиды точечные; ОС – оксиды строчечные; СХ – силикаты хрупкие; СП – силикаты пластичные; СН – силикаты недеформирующиеся; С – сульфиды; НС – нитриды строчечные; НТ – нитриды и карбонитриды точечные; НА – нитриды алюминия.

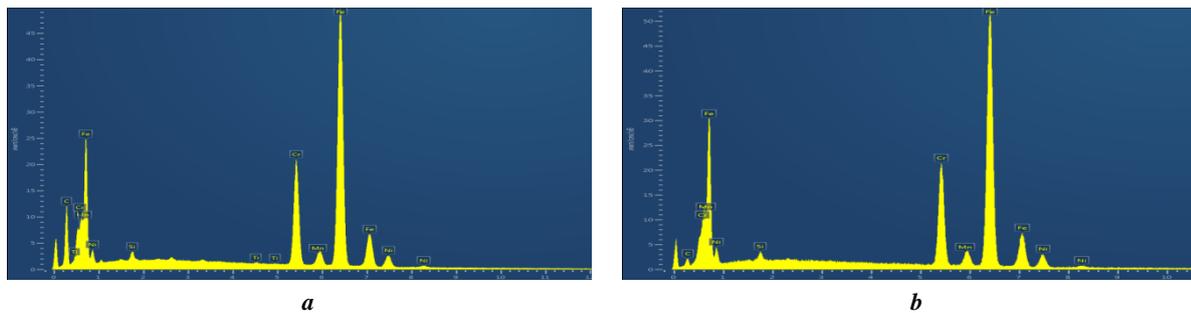


Рис. 3. Спектры стали 12Х18Н9: **a** – проволока; **b** – порошок
 Fig. 3. 12H18N9 steel spectra: **a** – a wire; **b** – a powder

Таблица 3. Химические составы исходных проволоки и порошка стали 12Х18Н9
 Table 3. Chemical compositions of original 12H18N9 steel wire and powder

Материал	Химический состав, мас. %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Проволока 12Х18Н9	0,11	0,49	1,14	18,20	9,49	0,011	0,012
Средний состав порошка	0,11	0,48	1,14	18,18	9,40	0,011	0,011

агрессивной среды. Время существования капли на, возникающей на торце сварочного электрода или сварочной проволоки в защитных газах, что связано с высокой скоростью газоплазменного факела и ее мгновенным отрывом от поверхности фидстока. Отрыв осуществляется в результате действия различных сил: давления дуги, реактивных сил при испарении металла и выделении газов, гравитационных сил, силы поверхностного натяжения, электродинамических сил и др. В момент отрыва капля характеризуется определенными размерами, температурой и начальной скоростью [18; 19].

После отрыва капли она движется в среде практически холодного защитного газа, температура которого не превышает несколько десятков градусов, постепенно кристаллизуется и охлаждается. В зависимости от условий распыления, температуры плавления распыляемого материала, длины свободного пробега частицы внутри камеры распыления (до соударения с днищем камеры) защитная среда может иметь пониженное, нормальное или повышенное давление, быть либо неподвижной (при отсутствии поступления дополнительных объемов газа через форсунки пояса «кипящего слоя», расположенные в средней части цилиндрической поверхности камеры распыления), либо подвижной. В этом случае скорость и направление движения газа в камере будет определяться параметрами поддува системы «кипящего слоя».

Выброс капель с расплавленной струей плазмы поверхности фидстока начинается при плазменной нагрузке выше порога плавления, но ниже порога кипения материала. Представляется возможным описать процесс образования и движения капли с помощью теории

малых возмущений и пульсацию жидкости в струе газа. Эти возмущения обеспечивают волновой характер перемещения жидкости с растущей амплитудой колебания волны, которая образует будущую каплю, причем именно длина волны определяет диаметр капли [18–21]. При относительно малой скорости истечения характер и степень деформации струи определяются только осесимметричными колебаниями, амплитуда которых возрастает по мере удаления от точки распада. Распад струи сопровождается образованием крупных однородных по размеру капель. Повышение скорости истечения приводит к возникновению режима объемного распыления, причем зона взрывного разрушения крупных исходных капель сдвигается непосредственно к точке распыления, образуя факел из распыленных, неоднородных по размеру микрокапель жидкости. В свою очередь, размер образовавшихся микрокапель определяется распределением плотности теплового потока на поверхности проволоки. Это распределение неравномерно: поперечное обтекание плазменным потоком стороны проволоки, повернутой к плазматрону, происходит обычно в условиях ламинарного течения, а на обратной стороне возможны отрыв и турбулизация плазмы [19], что полностью подтверждается полученными результатами анализа гранулометрического состава полученных порошков. Очевидно, что увеличение силы тока, подаваемого на плазматрон, и скорости плазмообразующего газа приводят к увеличению зоны взрывного разрушения, ее смещению в направлении точки распыления и увеличению доли более мелких сферических капель. Анализ таблицы 1 позволяет утверждать, что при увеличении скорости истечения, определяемой скоростью подачи плазмообразующего газа,

с 30 до 50 л/мин доля мелких (товарных) фракций возрастает примерно в два раза. Роль энергетического фактора – силы тока более неоднозначна и имеет выраженный участок насыщения. Если при увеличении силы тока, подаваемого на плазматрон, с 200 до 300 А доля товарных фракций постоянно растет, то при дальнейшем повышении силы тока (до 350 А) происходит стабилизация гранулометрического состава получаемых порошков и процентное содержание товарных фракций практически не изменяется.

Еще одним параметром, определяющим качество получаемых порошков, является скорость подачи защитного газа. Образующаяся в средней части колонны распыления холодная газовая завеса кипящего слоя, распространяющаяся в плоскости, перпендикулярной факелу распыления, тормозит и дополнительно подсушивает порошковые частицы, обеспечивая получение качественных сферических порошков. Так, в отсутствие газовой завесы кипящего слоя доли порошка сферической и округлой формы (ГОСТ 25849-83) примерно равны, а при суммарной подаче защитного газа через 12 форсунок системы кипящего слоя, равной 120–150 л/мин, доля сферических порошков составляет уже более 92 %.

Анализ химического состава, наличия и количества неметаллических включений, поверхностных и объемных дефектов распыленных частиц стали 12Х18Н9 и сплава ВЖ98 показал полное соответствие полученных порошков требованиям, предъявляемым к порошкам для аддитивных машин. А результаты механических испытаний образцов, изготовленных из распыленных порошков методом селективного лазерного сплавления, полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к этим материалам.

Таким образом, были определены основные технологические параметры работы атомайзера, позволяющие методом плазменной атомизации получать мелкодисперсные порошки, пригодные для их дальнейшего использования в 3D-принтерах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Показана принципиальная возможность управления размерами и формой частиц порошка при распылении твердых фидстоков в камере плазменного атомайзера за счет регулирования трех основных технологических параметров – силы тока, подаваемого на плазматрон, скорости подачи плазмообразующего газа и объема подачи защитного газа в систему «кипящего слоя». Установлено, что с повышением скорости плазмообразующего газа с 30 до 50 л/мин средний размер частиц порошка d_{50} монотонно снижается. Роль силы тока носит более сложный характер – увеличение от 250 до 300 А – приводит к уменьшению диаметра частиц, дальнейшее повышение до 350 А – практически не изменяет их средний геометрический размер. Продувка камеры распыления защитным газом обеспечивает повышение сферичности получаемого порошка от 55–60 % при отсутствии продувки до 92–96 % при объеме продувки в 15 л/мин. Дальнейшее увеличение объема продувки практически не изменяет показатель сферичности.

2. Установлено, что при обеспечении оптимальных параметров распыления могут быть получены порошки,

химические составы которых не отличаются от составов исходных фидстоков, а содержание частиц с неметаллическими включениями, наружными и внутренними дефектами не превышает 0,2–0,5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22–25.
2. Петров И.М. Основные тенденции российского рынка металлических порошков для аддитивных технологий // *Аддитивные технологии*. 2019. № 1. С. 24–26.
3. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229. № 11. P. 2132–2147.
4. Дектярев А.В., Товпинец А.О., Гришин П.Р., Лейцин В.Н., Морозов В.Н. Сравнительный анализ физико-механических характеристик материалов аддитивного производства с традиционными методами литья как возможность применения 3D-печати в ремонтных работах на борту судна в рейсе в условиях Арктической зоны // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2020. № 2. С. 41–48.
5. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: НАМИ, 2015. 220 с.
6. Дресвянников В.А., Страхов Е.П. Классификация аддитивных технологий и анализ направлений их экономического использования // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*. 2018. № 2. С. 16–28.
7. Шимохин А.В. Экономическое обоснование внедрения аддитивной технологии в технологические процессы производства продукции предприятия // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Экономика и экологический менеджмент*. 2019. № 4. С. 13–19.
8. Dröder K., Heyn J.K., Gerbers R., Wonenberg B., Dietrich F. Partial Additive Manufacturing: Experiments and Prospects with regard to Large Series Production // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 55. P. 122–127.
9. Терентьева О.А., Маймистов Д.Н., Гусев К.А., Флисюк Е.В., Наркевич И.А. Аддитивные технологии в фармацевтике. М.: КноРус, 2021. 172 с.
10. Смуров И.Ю., Конов С.Г., Котобан Д.В. О внедрении аддитивных технологий и производства в отечественную промышленность // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2015. № 2. С. 11–22.
11. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУЦП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1. С. 3–33.
12. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *International Materials Reviews*. 2016. Vol. 61. № 5. P. 315–360.
13. Григорьев А.В., Разумов Н.Г., Попович А.А., Самохин А.В. Плазменная сфероидизация порошков на

- основе сплавов Nb-Si, полученных механическим легированием // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2017. Т. 23. № 1. С. 247–254.
14. Тимофеев А.Н., Логачева А.И. От металлургии гранул к аддитивным технологиям // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2018. № 3. С. 84–94.
 15. Алымов М.И., Левинский Ю.В., Набойченко С.С., Касимцев А.В., Панов В.С., Оглезнева С.А., Мильяев И.М., Тимофеев И.А., Вершинина Е.В., Абоганбиев А.Ю., Тузов Ю.В., Фомина О.Н., Комлев В.С. Металлические порошки и порошковые материалы. М.: Научный мир, 2018. 610 с.
 16. Головков В.Г., Пашко С.А. Аддитивные технологии в России // Управление качеством. 2017. № 9. С. 43–48.
 17. Ermakov B.S., Ermakov S.B., Pavlenko A., Vologzhanina S.A. Regulation of powder particle sizes during plasma spraying // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 826. № 1. Article number 012007.
 18. Linke J., Akiba M., Duwe R., Lodato A., Penkalla H.-J., Rodig M., Schopflin K. Material degradation and particle formation under transient thermal loads // Journal of Nuclear Materials. 2001. Vol. 290-293. P. 1102–1106.
 19. Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V., Barsuk V., Kurkin S., Mironova E., Piazza G., Würz H., Zhitlukhin A. Macroscopic erosion of divertor materials under plasma heat load typical for ITER hard disruption // Вопросы атомной науки и техники. 2002. № 5. С. 27–29.
 20. Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н., Петров С.В. Нагрев и плавление проволоки-анода при плазменно-дуговом напылении // Автоматическая сварка. 2011. № 5. С. 5–11.
 21. Мордынский В.Б., Гусев В.М., Тюфтяев А.С., Булаков А.Г., Саргсян М.А. Диспергирование капли при электродуговой металлизации // Физика химия обработки материалов. 2016. № 6. С. 74–81.
 22. Dresvyannikov V.A., Strakhov E.P. Classification of additive technologies and analysis of directions of their economic use. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, 2018, no. 2, pp. 16–28.
 23. Shimokhin A.V. Economic substantiation of the introduction of additive technology in the technological processes of production of the production of the company. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment*, 2019, no. 4, pp. 13–19.
 24. Dröder K., Heyn J.K., Gerbers R., Wonenberg B., Dietrich F. Partial Additive Manufacturing: Experiments and Prospects with regard to Large Series Production. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 122–127.
 25. Terenteva O.A., Maymistov D.N., Gusev K.A., Fli-syuk E.V., Narkevich I.A. *Additivnyye tekhnologii v farmatsii* [Additive technologies in pharmacy]. Moscow, KnoRus Publ., 2021. 172 p.
 26. Smurov I.Yu., Konov S.G., Kotoban D.V. On the implementation of additive technologies and manufacturing into the Russian industry. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2015, no. 2, pp. 11–22.
 27. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC OF RF on realization of “Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030”. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1, pp. 3–33.
 28. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360.
 29. Grigorev A.V., Razumov N.G., Popovich A.A., Samokhin A.V. Plasma spheroidization of Nb-Si-based powder alloys obtained by mechanical alloying. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 247–254.
 30. Timofeev A.N., Logacheva A.I. From metallurgy of granules to additive technologies. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, 2018, no. 3, pp. 84–94.
 31. Alymov M.I., Levinskiy Yu.V., Naboychenko S.S., Kasimtsev A.V., Panov V.S., Oglezneva S.A., Milyaev I.M., Timofeev I.A., Vershinina E.V., Aboganbiev A.Yu., Tuzov Yu.V., Fomina O.N., Komlev V.S. *Metallicheskie poroshki i poroshkovye materialy* [Metal powders and powder materials]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2018. 610 p.
 32. Golovkov V.G., Pashko S.A. Additive technologies in Russia. *Upravlenie kachestvom*, 2017, no. 9, pp. 43–48.
 33. Ermakov B.S., Ermakov S.B., Pavlenko A., Vologzhanina S.A. Regulation of powder particle sizes during plasma spraying. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 826, no. 1, article number 012007.
 34. Linke J., Akiba M., Duwe R., Lodato A., Penkalla H.-J., Rodig M., Schopflin K. Material degradation and particle formation under transient thermal loads. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, vol. 290-293, pp. 1102–1106.
 35. Safronov V., Arkhipov N., Bakhtin V., Barsuk V., Kurkin S., Mironova E., Piazza G., Würz H., Zhitlukhin A. Macroscopic erosion of divertor materials under plasma

REFERENCES

1. Sirotkin O.S. State-of-the-art and prospects of development of additive technologies. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2015, no. 2, pp. 22–25.
2. Petrov I.M. Principal trends in the Russian market of metal powders for additive technologies. *Additivnyye tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 24–26.
3. Uriondo A., Esperon-Miguez M., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2015, vol. 229, no. 11, pp. 2132–2147.
4. Dektyarev A.V., Tovpinets A.O., Grishin P.R., Leytsin V.N., Morozov V.N. Comparative analysis of physical stress-strain properties of materials of additive production with common methods of casting as possibility to use 3d-printing in repair works on board ship in voyage under arctic conditions. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2020, no. 2, pp. 41–48.
5. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. *Additivnyye tekhnologii v mashinostroenii* [Additive technologies in engineering]. Moscow, NAMI Publ., 2015. 220 p.

- heat load typical for ITER hard disruption. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*, 2002, no. 5, pp. 27–29.
20. Kharlamov M.Yu., Krivtsun I.V., Korzhik V.N., Petrov S.V. Heating and melting of an anode wire during arc plasma spraying. *Avtomaticheskaya svarka*, 2011, no. 5, pp. 5–11.
21. Mordynskiy V.B., Gusev V.M., Tyuftyaev A.S., Buklakov A.G., Sargsyan M.A. Dispersion of drops under arc spraying. *Fizika khimiya obrabotki materialov*, 2016, no. 6, pp. 74–81.

Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying

© 2021

Sergey B. Ermakov, Director of the Research and Education Center “Severstal-Polytech”
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg (Russia)

E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Abstract: Additive technologies are among the most rapidly developing areas of modern production. To ensure the progressive movement of additive technologies development in the Russian Federation, it is necessary to provide maximum availability of additive raw materials – spherical metal powders for the domestic enterprises; however, the absence of domestic assemblies to produce such powders hampers the solution of this issue. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University has developed and successfully carried out industrial tests of a plasma atomization system for solid metal feedstocks of various chemical compositions. The paper presents the results of the study of the influence of some technological parameters on the granulometric size, shape, and defect structure of 12H18N9 steel and VG98 alloy powders. The paper includes the results of the research of the influence of such spraying parameters as the current strength and the plasma-forming gas velocity supplied to the plasma generator and the volume of protective gas supplied to the spray torch through the fluidized bed system nozzles located in the midsection of the atomizer spraying chamber. The study showed that by increasing the current strength and the plasma-forming gas velocity, it is possible to reduce the average size of the powder particles; and by changing the volume of the protective gas supply, it is possible to control the particle shape. The analysis of the chemical composition of the obtained powders shows that during the spraying process, there is no loss of alloying elements and the powder composition is the same as the original feedstock compositions. The paper gives the developed modes for the alloy feedstocks spraying, shows the possibility to produce metal powders with the level of the spherical shape factor of 92–96 % and minimal – not exceeding 0.5 % of powder aggregate weight – number of particles with nonmetallic inclusions, external and internal defects.

Keywords: additive technologies; plasma atomization; metal and alloy powders; spraying modes; granulometric composition; spherical shape factor; 12H18N9 steel; VG98 alloy.

For citation: Ermakov S.B. Regulation of powder particles shape and size at plasma spraying. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 1, pp. 7–15. DOI: 10.18323/2073-5073-2021-1-7-15.